

Hybrid형 초전도 한류기의 동시퀀치 유도방안

최호상*, 현옥배, 김혜림, 박권배, 황시돌
한전 전력연구원, 전력계통연구소

A method for simultaneous quench of hybrid type superconducting fault current limiter

Hyo-Sang Choi, Ok-Bae Hyun, Hye-Rim Kim, Kwon-Bae Park, Si-Dole Hwang
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - We investigated the properties of a hybrid type superconducting fault current limiter (SFCL), which consists of a transformer with multiple secondary windings and resistive YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) thin film stripes. The secondary windings of the transformer were coupled with each other, and a superconducting current limiting unit of YBCO stripes was connected to each of them as a switch. Simple connection in series of SFCL units tends to produce imbalance in power among the units due to slight differences in quench current. In current design, magnetic coupling between the SFCL units provides a solution to power dissipation imbalance, inducing simultaneous quench by current redistribution in the YBCO films.

1. 서 론

저항형 한류기를 실용화하기 위하여 가장 중요한 점은 전압등급 증대를 위한 한류소자간 직렬연결이다. 특성이 거의 동일한 한류소자를 직렬연결하면 예상과 달리 소자간에 심한 파워불균형이 발생한다. 이러한 문제는 1차적으로 선티저항을 이용하여 해결될 수 있으나 선티저항에 의한 약간의 손실을 감수해야만 한다. [1-3] 본 논문에서는, 이러한 문제를 해결하는 또 하나의 방법으로 써 변압기 코아를 이용한 hybrid형 초전도 한류기를 설계하고, 2차측의 특수한 권선을 통하여 한류소자간 파워불균형을 해소하는 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 YBCO 박막형 한류소자의 패턴 모양은 참고문헌 1에 표시한 바와 같으며 실험을 위한 측정 회로도는 Fig. 1에 나타내었다.

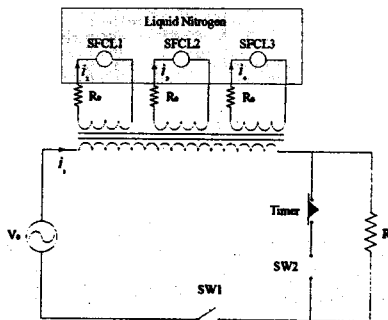


Fig. 1. Scheme of a test circuit for hybrid type SFCLs.

여기서, V₀는 인가전원이고, R₀는 1,2차 권선사이의 위상차를 보정하기 위한 저항으로써 0.5 Ω이다. 또한 R_L은 부하를 모의한 것으로 144 Ω이며, 그림에서 회색으로 표시된 부분은 정상상태에서 한류소자를 초전도 상태로 유지하기 위하여 액체질소 안에 잠기도록 하였다.

2. 실험 결과 및 검토

본 실험에서는 전압 용량증대를 위하여 한류소자 3개를 사용하였다. Fig. 2는 각 한류소자의 개별 I-V 특성 곡선을 보여준다. 이때 인가전압 V₀은 25 V_{rms} 이었다. 그림에서 보는 바와 같이, 퀀치 전류 I_q는 약간의 차이를 나타내었으며 SFCL1, SFCL2, SFCL3의 퀀치전류는 각각 20.8 mA, 22.6 mA 그리고 19.7 mA 이었다. 각 한류소자의 상전이 특성을 조사하기 위하여, E ≈ (i)ⁿ 식에 의한 n값을 계산하였는데, 그 값은 1~10 mV/cm의 범위에서 각각 12.7, 16.8 그리고 11.8 이었다. I_q값이 높을수록 더 좋은 상전이특성을 보임을 확인할 수 있었다.

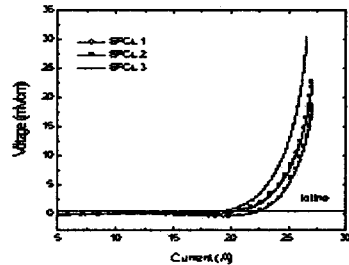


Fig. 2. I-V curves of individual SFCL units

Fig. 3은 특성이 거의 동일한 한류소자 3개를 인가 전압 220 V_{rms}에서 단순 직렬연결한 경우 퀀치특성을 보여준다. 이때 회로의 지배방정식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$(R_0 + R_L)i_1 = V_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$(R_0 + R_{SFCL1} + R_{SFCL2} + R_{SFCL3} + R_L)i_1 = V_0 \sin \omega t \quad (2)$$

Fig. 2와 위의 수식 (1), (2)에서 기대되는 바와 같이 SFCL3가 먼저 퀀치되고 이어서 SFCL1이 퀀치되었다. 한편, SFCL2는 거의 퀀치가 이루어지지 않았다. 퀀치시작 시점의 이러한 차이는 파워감당 측면에서 한류소자간에 심각한 불균형을 초래한다. 즉, 초기퀀치 기간동안에 인가된 대부분의 파워를 SFCL3가 감당하게 된다. 실제로, 사고순간으로부터 3 주기후의 SFCL3의 저항값은 23 Ω까지 상승하였으며 이는 190 K의 온도에 상응한다. 그러므로, 더 이상 전압등급을 올릴 수 없게 된다. 다시말해, 직렬연결시 한류소자의 동시퀀치는 대단히 중요한 요소임을 알 수 있다.

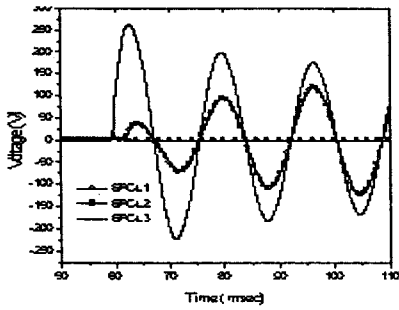


Fig. 3. Voltage properties of three SFCLs connected simply in series

초전도 한류소자의 이러한 파워 불균형을 해소하기 위한 하나의 방법으로써, 우리는 3개의 변압기를 이용하였다. 1차 권선은 각각 직렬로 연결하였으며, 2차 권선은 SFCL1, SFCL2 그리고 SFCL3에 각각 연결하였다. 권선의 권수비를 1:1로 함으로써 1, 2차측에 흐르는 전류를 동일하게 하였다. Fig. 4는 인가전압 220 V_{rms}에서 퀘칭특성을 보여준다. 각 한류소자의 퀘칭시작시점은 동일하나 발생전압은 달랐다. 전압발생의 순서는 I₀값과 반비례하는 특성을 보여주었다. 전반적으로 퀘칭특성은 단순 직렬연결보다 개선되었지만 여전히 약간의 파워불균형이 남아있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 다음 식 (3)-(6)으로부터 해석될 수 있다. 즉, 1, 2차 권선간에 flux linkage는 존재하지만 2차권선간의 자속의 결합이 없기 때문에 약간의 파워 불균형이 존재한다고 볼 수 있다.

$$R_L i_1 + \frac{d\phi_1(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_2(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_3(i_3)}{dt} + \frac{d\phi_4(i_4)}{dt} = V_0 \sin \omega t \quad (3)$$

$$(R_0 + R_{SFCL1}(i_2, B, T))i_2 + \frac{d\phi_2(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_{21}(i_1)}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$(R_0 + R_{SFCL2}(i_3, B, T))i_3 + \frac{d\phi_3(i_3)}{dt} + \frac{d\phi_{31}(i_1)}{dt} = 0 \quad (5)$$

$$(R_0 + R_{SFCL3}(i_4, B, T))i_4 + \frac{d\phi_4(i_4)}{dt} + \frac{d\phi_{41}(i_1)}{dt} = 0 \quad (6)$$

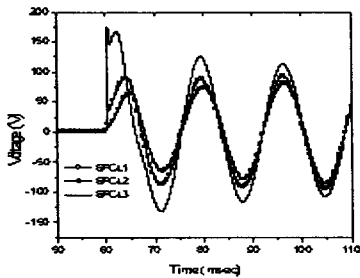


Fig. 4. Voltage properties of SFCL units using 3 ferromagnetic core

$$R_L i_1 + \frac{d\phi_1(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_2(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_3(i_3)}{dt} + \frac{d\phi_4(i_4)}{dt} = V_0 \sin \omega t \quad (7)$$

$$(R_0 + R_{SFCL1}(i_2, B, T))i_2 + \frac{d\phi_2(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_{21}(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_{23}(i_3)}{dt} + \frac{d\phi_{24}(i_4)}{dt} = 0 \quad (8)$$

$$(R_0 + R_{SFCL2}(i_3, B, T))i_3 + \frac{d\phi_3(i_3)}{dt} + \frac{d\phi_{31}(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_{32}(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_{34}(i_4)}{dt} = 0 \quad (9)$$

$$(R_0 + R_{SFCL3}(i_4, B, T))i_4 + \frac{d\phi_4(i_4)}{dt} + \frac{d\phi_{41}(i_1)}{dt} + \frac{d\phi_{42}(i_2)}{dt} + \frac{d\phi_{43}(i_3)}{dt} = 0 \quad (10)$$

마지막으로, 우리는 1, 2차 권선에 단 하나의 코어를 사용하여 2차측 권선의 flux linkage를 강화하였다. 이에 대한 수식을 위의 (7)-(10)에 나타내었다. 식에서 확인할 수 있는 바와 같이, 식 (3)-(6)에 비하여 2차

권선간의 상호작용이 추가되었음을 알 수 있다. 즉, 2차측 권선에 연결된 SFCL 소자의 퀘칭이 1차측 권선간과 2차측 권선간의 상호 자속결합 때문에 가속화된 것이다. Fig. 5는 이에 대한 한류소자의 퀘칭특성을 보여준다. 한류소자의 퀘칭시작시점이 거의 동일하고, 그들의 전압도 SFCL1, SFCL2 그리고 SFCL3 사이에서 거의 균등하게 분포되었다. 퀘칭순간으로부터 3 주기후의 SFCL1의 저항은 동시퀘칭 때문에 16 Ω 밖에 상승하지 않았다. 따라서 개별 한류소자의 전압등급을 높일 수 있게 된다.

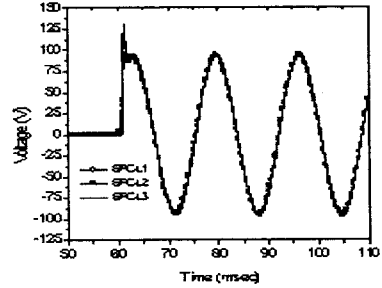


Fig. 5. Voltage properties of SFCL units using single ferromagnetic core

퀘칭시작시점의 퀘칭거동을 보면, 하나의 한류소자가 일단 퀘칭된 후 상호 자속결합에 의하여 다른 한류소자의 전류가 증가하여 퀘칭시작시점이 빨라진다. 이에 따라 맨 나중에 퀘칭되는 한류소자의 전류도 증가하여 급속하게 퀘칭시점에 도달하게 된다. 즉, 전류의 재분배 효과에 의하여 한류소자간에 동시퀘칭이 발생하는 것이다.

3. 결 론

YBCO 박막형 한류소자의 전압등급을 올리는데 필수적인 직렬연결에서의 동시퀘칭방안에 대하여 고찰하였다. 단순직렬연결은 각 소자의 퀘칭전류밀도의 차이에 의하여 심한 파워 불균형을 가져왔다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로써 두 가지 실험을 하였다. 변압기의 1,2차 권선 사이에 부분적으로 자기적 결합을 하였을 때는 퀘칭시작시점은 동일하여 졌으나 초전도 한류소자의 발생전압의 불균형이 여전히 존재하였다. 두 번째로 1, 2차권선 상호간과 2차측 소자간에 자기적 결합을 이루었을 때는 퀘칭시작시점이 동일해 졌을 뿐만 아니라 발생전압도 동일하여졌다. 이러한 방식은 주어진 한류소자의 전압계급을 올리는데 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Hyo-Sang Choi, Ok-Bae Hyun, Hye-Rim Kim. "Quench characteristics of resistive superconducting fault current limiters based on YBa₂Cu₃O₇ films." *PHYSICA C*, vol. 351, pp. 415-420, 2001.
- [2] Hyo-Sang Choi, Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun and Sang-Joon Kim. "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches." *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, vol. 11, no. 1, March, pp. 2418-2421, 2001.
- [3] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun. "Initial quench development in uniform Au/Y-Ba-Cu-O thin film." *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, vol. 11, no. 1, March, pp. 2414-2417, 2001.